

数値波動水槽における砕波変形計算の高精度化

Advanced Deformation Method for Breaking Waves by using CADMAS-SURF/3D

有川太郎¹・山野貴司²・秋山 実³

Taro ARIKAWA, Takashi YAMANO, Minoru AKIYAMA

This report describes advanced deformation scheme for breaking waves, and the results of breaking wave simulation. A three-dimensional numerical wave tank was developed. This code is also adapted to the parallel computing system and multi grid size system, so that the problem is more efficiently solved. This code is called 'CADMAS-SURF/3D' (Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure in 3D). At first, the accuracy of prediction of breaking point was checked in the wave flume, and the validity was verified due to comparison of the Goda's breaking index. Then, the performance of 3 dimensional breaking problems was tried. Two types of submerged breakwater were installed in our Tank. Results were qualitatively good agreement with experiments.

1. はじめに

実務において、数値実験システムを用いて、防波堤等沿岸構造物に作用する波力を計測し、構造物の設計に適用する機会が、今後ますます増えることが予想される。しかし、実務適用するためには、衝撃砕波力などを精度良く求める必要があるが、それらは波浪形状に大きく依存することがわかっている。これまで3次元数値シミュレーションを用いた砕波に関する検討は数多くあり（たとえば、渡部ら（2006）、後藤ら（2005））、砕波帯内での渦構造やジェットの着水など、砕波現象に関する物理的メカニズムが明らかになりつつある。しかし、実務適用を考えた場合、ある程度の格子の大きさで、砕波点や砕波変形が精度良く計算できることが望ましい。そこで、すでに実務に対して適用事例が存在する数値波動水路（数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会、2002）を用いた砕波変形計算の高精度化手法を提案するとともに、その妥当性について論じる。

2. 計算モデル

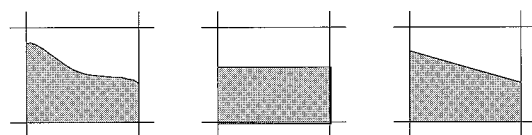
(1) 基礎方程式

数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D は3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をボラスモデルに基づいて拡張したものであり、基礎方程式は、有川ら（2005）に詳しい。

(2) 水表面計算手法

a) 概 略

ドナー・アクセプタ法では、図-1(b)に示すとおり、界面を計算格子に垂直に設定するため移流量の精度が低



(a) モデル化前 (b) ドナー・アクセプタ (c) 今回

図-1 界面のモデル化

下するという問題がある。この問題に対処するため、図-1(c)に示すとおり、界面を1次関数（3次元では平面）で表現し、その傾きを考慮する方法を導入する。なお、傾きを考慮するのはVOF関数の移流項についてであり、界面における流速の設定や圧力に関する計算は既存の方法で行う。界面の傾きを考慮した方法の計算手順は以下のとおりとなる。

- ①法線ベクトルの算出：VOF関数を数値微分し界面の法線ベクトルを算出する
- ②界面パターンの分類：法線の向きおよび移流方向から界面のパターンを分類する
- ③界面の決定：計算セルに含まれる流体の量から界面の方程式を決定する
- ④移流量の算出：界面の方程式および移流速度から移流量を算出する

以下では2次元（界面は1次関数）で記述し、詳細な分類・数式は紙面の都合上省くものとする。ここでの分類方法と同様のことを3次元に扱うことで、本研究で開発したものと同様の結果が得られる。

b) 法線ベクトルの算出

界面の法線ベクトルの算出方法は、元のモデルとの境界値の確保位置との整合性から、式(1)を用いてセル中心で算出する。ここで、 F はVOF値を表し、対象としているセルの水平方向座標を c_1 、鉛直方向座標を c_2 、

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官
2 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室
3 工修 みずは情報総研

また、それぞれの方向の n_1, n_2 を法線ベクトルとする。実際には、 n_1, n_2 は、 x 方向や z 方向となる。

$$n_1 = -\frac{\partial F}{\partial c_1}, n_2 = -\frac{\partial F}{\partial c_2} \dots\dots\dots (1)$$

c) 界面パターンの分類

それぞれの方向の格子間隔を $\Delta c_1, \Delta c_2$ とすると、界面 (1 次関数) は図-2 のとおりとなる。法線ベクトルの長さがゼロの場合は流体セルや気体セルであり、また、移流方向に垂直 ($n_2 \approx 0$) または水平 ($n_1 \approx 0$) であれば、ドナー・アクセプタ法で計算する。界面が傾斜している場合には、流体が占める割合から図-3 の P1-1 から P2-3 までの 6 パターンに分類する。

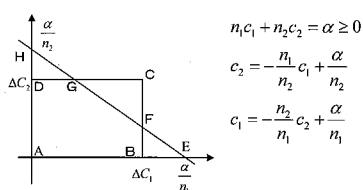


図-2 1 次関数で表された界面

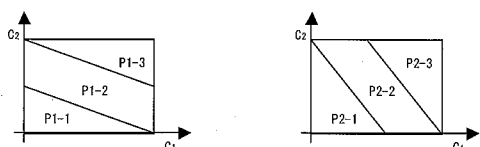


図-3 界面が傾斜しているときのパターンの分類

d) 界面の決定

対象としているセルに含まれる流体量は F 値から計算でき、それを用いて 1 次関数で表された界面

$$n_1 c_1 + n_2 c_2 = \alpha \dots\dots\dots (2)$$

の α を、式 (3)

$$\begin{cases} V_{give} = A\alpha^2 + B\alpha + c \\ A = (1 - H_1 - H_2) / 2n_1 n_2 \\ B = (2H_1 n_1 \Delta c_1 + 2H_2 n_2 \Delta c_2) / 2n_1 n_2 \\ C = (-H_1 n_1^2 \Delta c_1^2 - H_2 n_2^2 \Delta c_2^2) / 2n_1 n_2 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

の 2 次方程式を解くことにより決定する。ここで H_1, H_2 は図-3 で示される各パターンにより、表-1 のように決定される値である。

表-1 各パターンの係数

	P1-1	P1-2	P1-3	P2-1	P2-2	P2-3
H_1	0	1	1	0	0	1
H_2	0	0	1	0	1	1

e) 移流量の算出

図に示すように、流速分だけ移流するとし、その面積を計算することで、移流量を計算する。その結果界面の傾きを考慮した移流計算が可能となる。

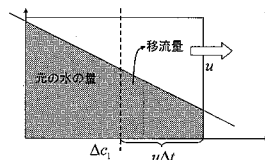


図-4 移流量の概念図

3. 断面水路における妥当性の検討

(1) 基本検証

まず、碎波計算の妥当性を検証するために、単純な水路を用いて計算から得られる碎波点と合田 (1970) の碎波指標との比較を行った。計算断面としては斜面勾配 1/10, 1/20, 1/30, 1/50 を水路内に設置し、入射波高、周期を変化させて碎波点を測定した (図-5)。なお、図中に格子サイズを表示しているが、表示していない区域に関しては、等差数列を用いた可変格子としている。また、奥行方向に関しては、格子サイズ 5 cm の 2 点として断面水路を構築した。

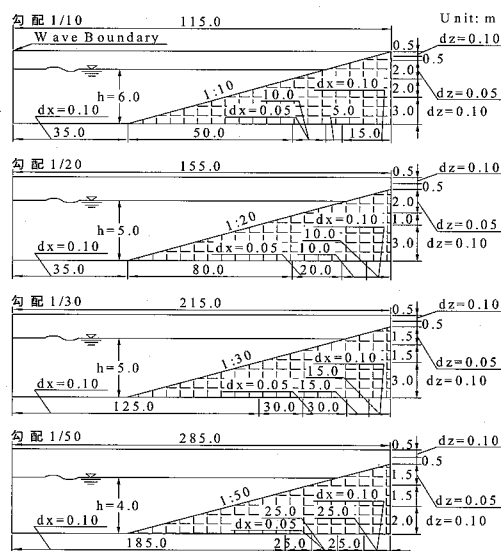


図-5 計算断面図

(2) 碎波変形計算の検証

碎波点は、岸沖方向の全格子点の水位から波高をゼロアップクロス法で計算し、その最大となる点とする。

図-6 に、海底勾配 1/10, 換算沖波波高比 H_0'/L_0

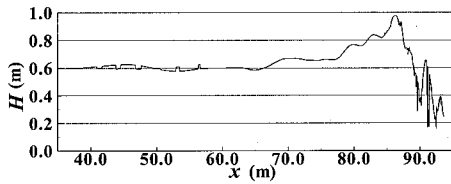
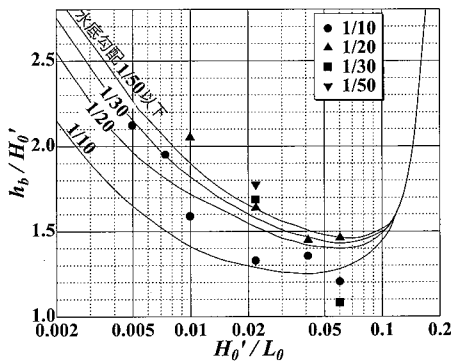


図-6 波高の岸沖方向分布の例

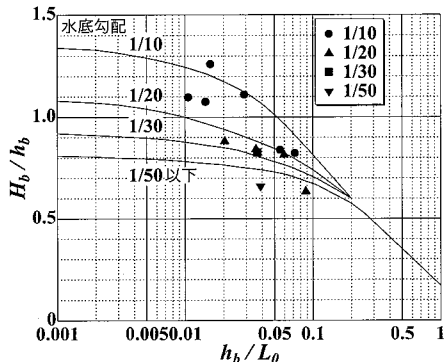
$\epsilon=0.020$ の場合における斜面前端から汀線までの波高の分布を一例として示す。汀線付近の振動は、遡上付近からの反射やスプラッシュの影響によるものである。

a) 合田の碎波指標との比較

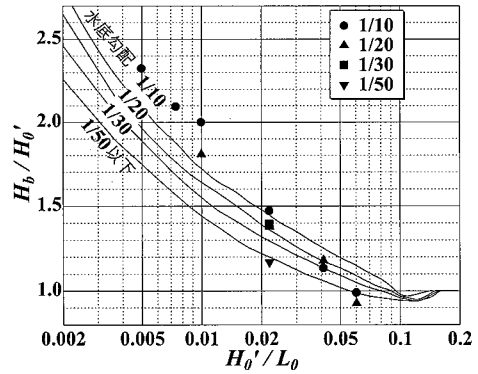
図-7 は、合田 (1970) の碎波指標と、本計算による結果とを比較した図であり、図-8 に、水底勾配 1/10 における碎波水深・換算沖波波高比の実験値と比較した結果を示す。図より、勾配による諸量の差が完全ではないものの、全般的な傾向は整合していることがわかる。特に、換算沖波波高が小さいほど精度が落ちている (図-7 (a) (b))。また、碎波波高および碎波波峰高においても同様の結果となった (図-7(c) (d))。ただし、図-8 より実験データとの整合性は良く、今後、ケースを増やして調査する。また、沖波波高が小さい場合の差異が生じる原因には、格子の大きさが考えられ、波高に対する鉛直方向の格子分割数が重要であることがわかる。



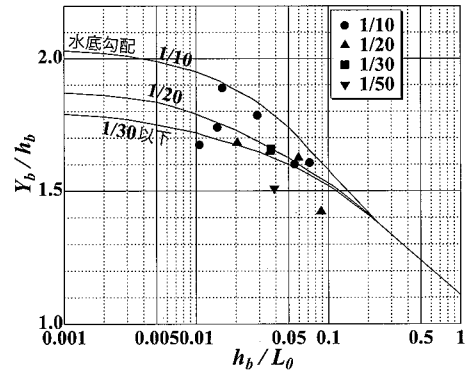
(a) 碎波水深・換算沖波波高比



(b) 碎波波高・水深比



(c) 碎波波高・換算沖波波高比



(d) 碎波波峰高・碎波水深比

図-7 合田 (1970) の碎波指標との比較

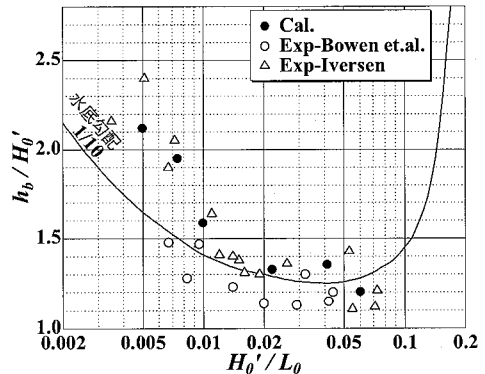
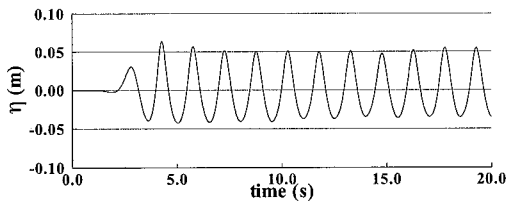


図-8 実験データとの比較

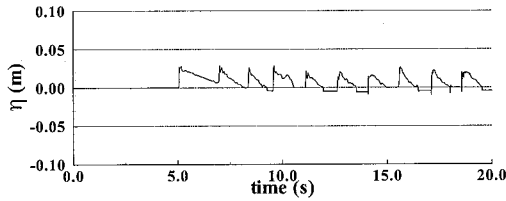
b) 碎波波形

3 種類の海底勾配と換算沖波波形勾配における、それぞれの碎波点で碎波が発生した時間の 0.25 s 毎の 1 秒間の空間波形を図-10 に示す。各波浪条件と地形条件、および碎波の形態は図-9 にプロットした 3 点のものである。

図-10(a) の崩れ碎波は良く再現していると思われるが、(b) の巻き碎波は崩れ碎波に、(c) の砕け寄せ波碎波は巻き碎波に近い形態となっている。



(a) $x=2.8\text{m}$ (円形型潜堤前端位置)



(b) $x=6.0\text{m}$ (円形型潜堤天端位置)

図-13 水面変動時系列

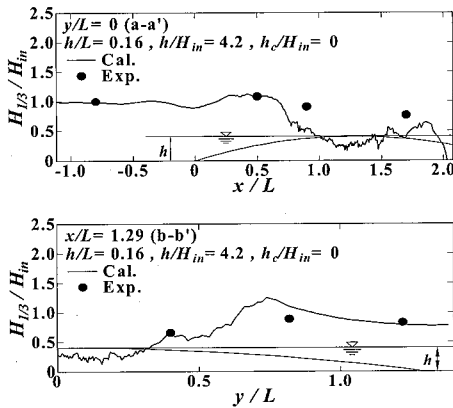


図-14 波高分布の実験値との比較

り、計算結果がある程度妥当であることがわかる。今後、不規則波への適用を行い、実験と詳細に比較検討したい。

(2) 三角潜堤における碎波変形計算

a) 計算水槽ならびに波浪条件

図-15 に三角潜堤の計算水槽を示す。波浪条件は、波高 $H=1.0, 0.7\text{m}$ の 2 種類、周期 $T=10.0, 12.0\text{s}$ の 2 種類で行った。

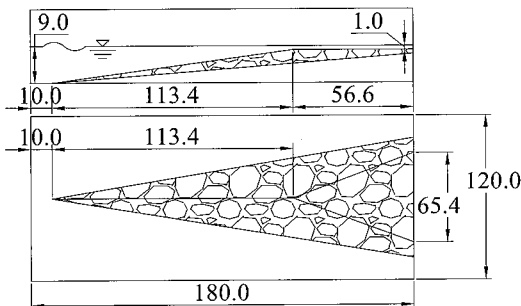


図-15 計算水槽 (上:断面, 下:平面 (単位 m))

b) 碎波の様子

図-16 は、三角潜堤の上での碎波変形の空間波形を示したものである。図より、本計算結果は碎波現象を良く再現できていると思われる。

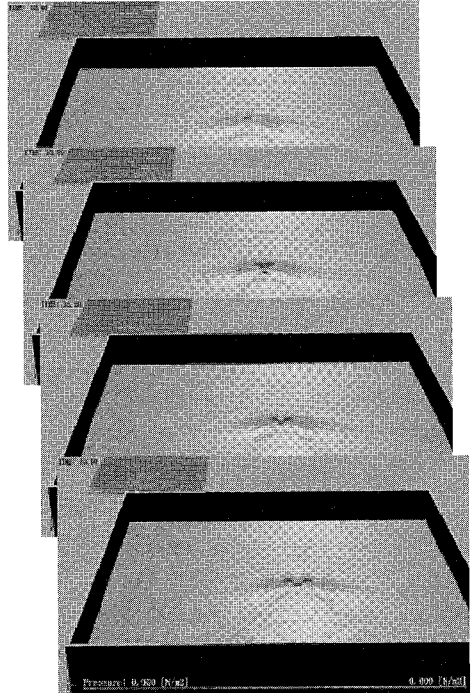


図-16 三角潜堤の上での碎波変形計算結果

5. ま と め

本研究では、基礎的な地形形状から碎波現象を検証し、潜堤に作用する現象を再現するための本計算手法の妥当性を明らかにした。しかしながらまだ不明瞭な部分もあるため、今後は水理実験との比較検討を行う必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 渡部靖憲・猿渡亜由未(2006): ジェットの着水過程における局所自由水面及び渦のダイナミクス, 第 53 回海講論文集, pp. 71-75.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎(2005): 粒子法による三次元数値波動水槽の開発, 第 52 回海講論文集, pp. 26-30.
- (財)沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12.
- 有川太郎・山田文則・秋山 実(2005): 3 次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討, 第 52 回海講論文集, pp. 46-50.
- 合田良実(1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, No. 180, pp. 39-49.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 30 巻, 1 号, pp. 21-67.